ÉOLIEN : L'ÉMERGENCE D'UNE INDUSTRIE

La croissance spectaculaire du marché éolien mondial traduit la volonté des pays industrialisés, surtout dans l'Union européenne, d'exploiter massivement les ressources considérables disponibles sur terre et en mer. Sur le marché naissant et prometteur des grandes éoliennes off-shore*, la technologie de pointe de Jeumont Industrie est un atout majeur pour la France. Le savoir-faire du CEA en matériaux, en mécanique des structures et des écoulements turbulents ainsi qu'en électronique peut contribuer à leur optimisation.*

Prototype de grande éolienne (750 kW) conçue par Jeumont Industrie (groupe Framatome) sur le site de Widehem (Pas-de-Calais) qui en comptera six. Ce type d'éolienne est produit en série dans le cadre du programme Éole 2005.



J.-Ch. Meyer/La Médiathèque EDF

Avec une capacité installée qui ne dépassait pas 23 MW fin 1999, la France est très peu équipée en éoliennes, alors que l'utilisation de l'énergie du vent connaît depuis plusieurs années une croissance spectaculaire dans l'Union européenne (encadré). Pourtant, son industrie dans ce domaine est en bonne santé et de nombreux fabricants français sont reconnus sur le plan international, mais surtout dans les secteurs des composants d'éolienne (encadré D, ***Le fonctionnement d'une éolienne classique***) comme la génératrice, les pales du rotor ou les couronnes utilisées pour la rotation du rotor, l'orientation des pales et celle de la nacelle. En revanche, si la PME Vergnet SA est un leader mondial du marché des petites éoliennes non connectées au réseau, il n'existe aucun industriel français sur le marché des grandes éoliennes. Seule la société Jeumont Industrie (filiale à 100 % du groupe Framatome) est en mesure de devenir un constructeur majeur, en mettant à profit ses compétences en électromécanique. Elle a inauguré en octobre 1999 sur le site de Widehem (Pas-de-Calais) un prototype de grande éolienne de 750 kW munie d'une génératrice innovante. Cette machine sera produite en série pour équiper des installations prévues dans le cadre du programme national Éole 2005 qui soutient, depuis 1996, l'industrie éolienne française et prévoit l'installation d'une capacité installée de 250 à 500 MW d'ici à 2005 en France. Au 31 janvier 2000, 55 projets étaient sélectionnés totalisant 367 MW, dont seulement 7,65 MW raccordés au réseau (en métropole et en Guadeloupe).

La montée en puissance des éoliennes

La forte croissance mondiale du marché des grandes installations terrestres s'accompagne chaque année d'une augmentation de la puissance moyenne des éoliennes nouvellement installées et, dans le même temps, d'une baisse des coûts de production. En Allemagne, la puissance moyenne des nouvelles machines s'est accrue de 780 kW en 1998 à 935 kW en 1999.

La multiplication des grandes installations pose alors le problème délicat de la recherche de sites terrestres favorables de grande taille et de la nécessaire limitation de l'impact des éoliennes sur leur environnement naturel et humain, surtout en Europe dans les pays de petite superficie comme le Danemark ou les Pays-Bas.

Dans ce contexte, l'éolien *offshore* naissant est beaucoup plus adapté à une croissance durable du marché. Les ressources en mer sont plus importantes que sur terre, mais surtout le vent y est plus fort et plus régulier et les grandes installations n'ont pas d'impact visuel et sonore sur les populations. Toutefois, comme les projets *offshore* sont plus coûteux que les projets terrestres, notamment à cause des fondations, du raccordement au réseau et de l'adaptation des machines à l'environnement marin, leur rentabilité ne peut être assurée qu'en concevant de grandes machines de plusieurs mégawatts.

Les évolutions technologiques majeures

De telles éoliennes n'en sont qu'au stade du prototype et constituent donc un premier défi technologique à relever. Mais l'apparition des génératrices multipolaires à "attaque directe et vitesse variable" pourrait également s'avérer déterminante sur le marché *offshore*.

Les génératrices à "attaque directe" fonctionnent à la vitesse basse du rotor, ce qui permet de supprimer le multiplicateur, composant lourd et coûteux, et présente l'avantage de donner des machines plus compactes, avec des charges de maintenance réduites. En complément, le concept de vitesse variable du rotor, en lieu et place du concept de vitesse fixe (le plus répandu), optimise la production d'électricité, la vitesse du rotor s'adaptant en permanence à la vitesse du vent. Très peu de constructeurs commercialisent, à ce jour, des grandes éoliennes qui intègrent ces deux concepts. C'est le cas d'Enercon (Allemagne), de Lagerwey the Windmaster (Pays-Bas) et de Jeumont Industrie.

Éoliennes offshore *au large du Danemark.*



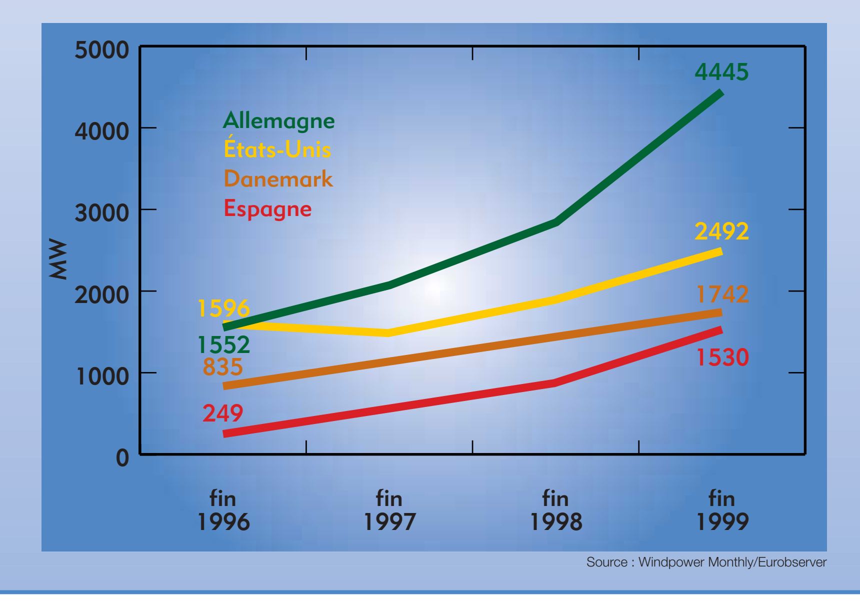
Iben Østergaard/DTi

L'éolienne de 750 kW à "attaque directe et vitesse variable" de Jeumont Industrie est équipée d'une génératrice innovante (dite à "technologie discoïde") et d'un convertisseur électronique qui permet le couplage au réseau et autorise le fonctionnement à la vitesse variable du rotor. Cette technologie de pointe unique permet d'obtenir des machines plus performantes et se distingue aussi de ses concurrentes par le concept de contrôle de puissance par **décrochage aérodynamique** (au lieu du calage variable).

Le marché mondial sera tiré par l'*offshore*

Le marché éolien mondial est aujourd'hui essentiellement un marché d'installations terrestres de 300 kW à 100 MW raccordées à un réseau électrique. Il connaît une forte croissance depuis plusieurs années, surtout dans l'Union européenne, dont trois États membres comptent parmi les quatre leaders mondiaux par la capacité installée (figure). C'est un marché très concurrentiel et évolutif, soutenu par les aides publiques mais proche de la rentabilité et largement dominé par les constructeurs européens, le premier constructeur mondial étant la société danoise Vestas.

Les petites installations terrestres de moins de 300 kW non connectées à un réseau constituent un marché de niche rentable et prometteur destiné en particulier à l'électrification rurale ou aux télécommunications. Le marché des grandes installations terrestres de 5 à 100 MW, qui utilise des éoliennes jusqu'à 1,5 MW ou plus, connaît la croissance la plus forte, mais celui des grandes installations *offshore*, qui apparaît en Europe du Nord, sera probablement le grand marché de demain.



Source : Windpower Monthly/Eurobserver

Le soutien à l'industrie éolienne française

Pour contribuer au développement de l'industrie éolienne française, l'Ademe (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) a prévu de consacrer 10 à 15 MF par an à la R&D sur l'énergie éolienne entre 1999 et 2003, dans un cadre national ou international. Parmi les axes de recherche décidés pour ce programme pluriannuel (recherche de base, développement industriel de nouvelles machines, évaluation du gisement éolien, suivi des performances des machines sur site), un axe majeur est consacré à la conception d'une gamme de machines de 2,5 à 3 MW destinées au marché *offshore* et utilisant la technologie de Jeumont Industrie, notamment pour la génératrice.

L'innovation technologique portera tout d'abord sur l'électronique de puissance. La technologie de Jeumont Industrie requiert en effet l'utilisation de composants ou de systèmes de contrôle adaptés, efficaces et toujours moins coûteux.

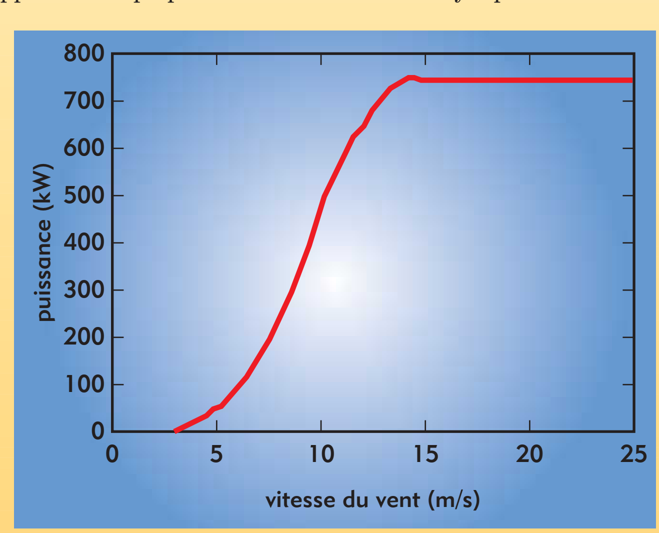
Il sera ensuite nécessaire de concevoir des grandes machines économiquement compétitives, plus légères, fiables et endurantes en environnement marin, sachant qu'il faudra étudier de façon pertinente le comportement dynamique de ces machines soumises aux effets combinés de la houle et du vent. Les efforts de R&D porteront, en particulier, sur les matériaux des pales en composites et des organes tournants, qui devront être protégés notamment de la corrosion marine, de la pluvio-érosion et du sable.

D

Le fonctionnement d'une éolienne classique

Une éolienne est constituée d'un rotor et d'une nacelle montés sur une tour. Le rotor comporte généralement 3 pales, plutôt que 1 ou 2, notamment pour une plus grande régularité des efforts sur la machine et une meilleure apparence visuelle, et tourne à une vitesse constante de l'ordre de 30 tours par minute. La nacelle abrite une génératrice asynchrone qui fonctionne à une vitesse de 1 500 tours par minute. La génératrice est accouplée au rotor par un multiplicateur de vitesse et l'énergie qu'elle produit est livrée sur le réseau par un transformateur de tension situé dans le pied de la tour, qui élève la tension au même niveau que celle du réseau. Dans toutes les éoliennes du commerce, le multiplicateur et la génératrice sont alignés selon un axe horizontal, mais il existe aussi un concept de rotor à axe vertical (rotor dit de Darrieus) qui n'a pas connu le développement espéré.

L'éolienne a une puissance instantanée proportionnelle à la surface balayée par le rotor et au cube de la vitesse du vent. On cherche donc à capter les vents plus forts situés à quelques dizaines de mètres du sol, au sommet de la tour. L'éolienne atteint sa puissance nominale pour un vent d'environ 14 m/s (figure). Au-delà, il faut limiter la vitesse du rotor et arrêter automatiquement l'éolienne quand la vitesse du vent est trop élevée, à 25 m/s (90 km/h).



Il existe deux techniques pour cette régulation de puissance : le calage variable (les pales peuvent pivoter autour de leur axe longitudinal afin de réduire la portance et donc le couple moteur) et le **décrochage aérodynamique** (la conception des pales induit ce phénomène qui limite l'action du vent quand la vitesse de celui-ci dépasse sa valeur nominale).

Enfin, des études génériques seront menées, notamment pour tenir compte des premiers retours d'expérience des éoliennes en mer de taille moyenne.

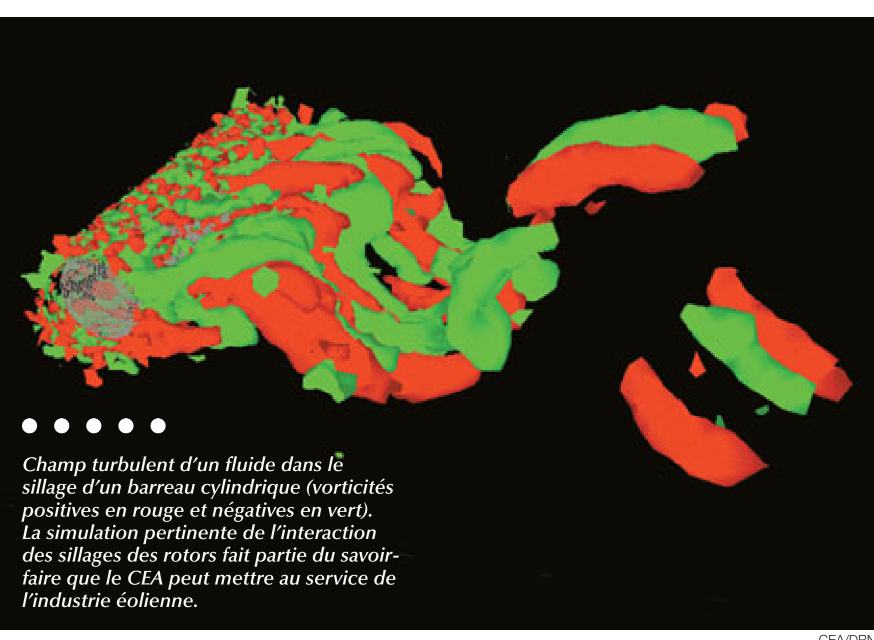
L'offre scientifique et technologique du CEA

En février 2000, le CEA a transmis à l'Ademe une offre de services pour une intervention potentielle en tant que nouvel opérateur de recherche dans les projets industriels éoliens nationaux cofinancés par l'Ademe et impliquant notamment Jeumont Industrie.

L'offre du CEA mobilise un ensemble pluridisciplinaire cohérent et complet de compétences et de moyens de calculs et d'essais. C'est notamment le cas dans les domaines du vieillissement et de l'élaboration des matériaux composites des pales, de la mécanique des structures d'une éolienne, des écoulements d'air turbulents et des interactions fluides-structures, de l'instrumentation et de l'électronique de puissance.

Cette offre marque la volonté du CEA de contribuer au développement de grandes éoliennes françaises destinées au marché *off-shore* et, plus généralement, d'apporter durablement son savoir-faire scientifique et technologique à la thématique de l'éolien, dès lors que la demande institutionnelle et industrielle existe.

Jean-Marc Agator
Direction de la stratégie et de l'évaluation
CEA/Saclay



Champ turbulent d'un fluide dans le sillage d'un barreau cylindrique (vorticités positives en rouge et négatives en vert). La simulation pertinente de l'interaction des sillages des rotors fait partie du savoir-faire que le CEA peut mettre au service de l'industrie éolienne.

CEA/DRN